



Analisis Risiko Kegagalan *Mechanical Seal* Pompa Pendingin terhadap Keandalan Operasional Kapal

Hasanudin* , Intan Baroroh, Ali Munazid

Universitas Hang Tuah, Indonesia

Email: hasanudin1201@gmail.com*

KEYWORD

Operational Reliability Of The Vessel; Risk Of Failure; Mechanical Seal; Vessel Cooling System; FMEA

ABSTRACT

The reliability of ship operations is an important factor in supporting the smooth and safe shipping of the ship. One of the supporting systems that plays a role in maintaining this reliability is the freshwater cooling system, where the cooling pump is equipped with a mechanical seal to prevent liquid leakage during operation. A malfunction in the mechanical seal can reduce the performance of the cooling system and potentially affect the operational reliability of the vessel. The study aims to identify the factors causing mechanical seal failure, analyze their impact on the operational reliability of the vessel, and determine the level of risk and mitigation measures required. The method used is Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) by identifying failure modes, causes, effects, and risk levels based on Severity (S), Incidence (O), and Detection (D) values. Data were obtained through observation, interviews, documentation, and literature studies. The results of the analysis identified six failure modes, with seal surface wear as the highest priority (RPN = 280), followed by mechanical seal leakage (RPN = 252) and decreased O-ring elasticity (RPN = 210). Reliability analysis showed an MTBF of 1,460 hours, a failure rate of 0.000685/hour, reliability of 71.0% at 500 hours of operation, and availability of 99.66%. The study recommends strengthening focused preventive maintenance on seal surfaces, mechanical seals, and O-rings to improve the reliability of the cooling system and minimize the risk of vessel operational disruption..

KATA KUNCI

Keandalan Operasional Kapal; Risiko Kegagalan; Segel Mekanis; Sistem Pendingin Kapal; FMEA

ABSTRAK

Keandalan operasional kapal merupakan faktor penting dalam mendukung kelancaran dan keselamatan pelayaran. Salah satu sistem pendukung yang berperan dalam menjaga keandalan ini adalah sistem pendingin air tawar, di mana pompa pendingin dilengkapi dengan segel mekanis untuk mencegah kebocoran cairan selama operasi. Gangguan pada segel mekanis dapat mengurangi kinerja sistem pendingin dan berpotensi memengaruhi keandalan operasional kapal. Studi ini bertujuan mengidentifikasi faktor-faktor penyebab kegagalan segel mekanis, menganalisis dampaknya terhadap keandalan operasional kapal, serta menentukan tingkat risiko dan tindakan mitigasi yang diperlukan. Metode yang digunakan adalah *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dengan mengidentifikasi mode kegagalan, penyebab, efek, dan tingkat risiko berdasarkan nilai Keparahan (S), Kejadian (O), dan Deteksi (D). Data diperoleh melalui observasi, wawancara, dokumentasi, dan studi literatur. Hasil analisis mengidentifikasi enam mode kegagalan, dengan keausan permukaan segel sebagai prioritas tertinggi (RPN = 280), diikuti kebocoran segel mekanis (RPN = 252) dan penurunan elastisitas O-ring (RPN = 210). Analisis keandalan menunjukkan MTBF 1.460 jam, tingkat kegagalan 0,000685/jam, keandalan 71,0% pada 500 jam operasi, dan ketersediaan 99,66%. Studi ini merekomendasikan penguatan pemeliharaan preventif terfokus pada permukaan segel, segel mekanis, dan O-ring untuk meningkatkan keandalan sistem pendingin dan meminimalkan risiko gangguan operasional kapal.

PENDAHULUAN

Keandalan operasional kapal adalah salah satu faktor penting dalam memastikan kelancaran dan keselamatan pelayaran. Meningkatnya aktivitas transportasi laut menyebabkan kapal beroperasi lebih lama dalam kondisi lingkungan yang beragam, seperti getaran, kelembapan tinggi, dan beban kerja yang berat. Kondisi ini dapat meningkatkan risiko gangguan pada sistem kapal, terutama mesin utama, yang berfungsi sebagai sumber daya utama kapal. Kerusakan pada mesin utama kapal dapat mengganggu operasi kapal dan bahkan berpotensi menyebabkan kegagalan perjalanan jika tidak segera ditangani (Youssef et al., 2024).

Mesin utama kapal didukung oleh beberapa sistem tambahan, salah satunya adalah sistem pendingin air tawar. Sistem pendingin berfungsi untuk menjaga suhu kerja mesin dalam batas operasi yang aman agar mencegah panas berlebih. Selain sistem pendingin, mesin utama juga didukung oleh sistem pelumasan, sistem bahan bakar, serta sistem udara masuk dan gas buang, yang semuanya saling terkait dalam menjaga kinerja mesin selama operasi kapal (Youssef et al., 2024).

Di dalam sistem pendingin air tawar terdapat pompa pendingin yang dilengkapi dengan segel mekanis sebagai komponen yang mencegah kebocoran cairan. Segel mekanis berfungsi untuk mencegah cairan pendingin keluar melalui celah antara poros dan rumah pompa saat pompa beroperasi. Kerusakan atau kegagalan segel mekanis dapat menyebabkan kebocoran cairan, mengurangi efektivitas sistem pendingin, dan meningkatkan risiko gangguan pada operasi kapal. Selain itu, getaran, kondisi operasi yang tidak ideal, dan gangguan pada komponen penyangga sistem penyegekan dapat memengaruhi keandalan segel mekanis dan mempercepat terjadinya kegagalan (Ashby et al., 2026).

Berdasarkan pengamatan di OSV ARKAREGA, ditemukan kebocoran di area segel mekanis pompa pendingin air tawar yang berpotensi memengaruhi kinerja sistem pendingin dan keandalan operasional kapal. Hasil inspeksi awal menunjukkan adanya gangguan pada sistem penyegekan pompa yang diduga terkait dengan kondisi segel mekanis dan komponen pendukungnya. Oleh karena itu, analisis risiko diperlukan untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan, dampak yang dihasilkan, dan menentukan prioritas penanganan yang tepat.

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji kegagalan segel mekanis dan penerapan metode analisis risiko dalam sistem permesinan kapal. Penelitian oleh (Abdillah, 2025) menunjukkan bahwa segel mekanis merupakan komponen penting dalam sistem pompa karena beroperasi secara terus-menerus di bawah kondisi tekanan dan suhu tinggi, dengan keausan permukaan segel dan kerusakan O-ring sebagai penyebab utama kebocoran pada sistem pendingin. Cooper et al. (2008) menekankan bahwa pemahaman mendalam tentang karakteristik kinerja pompa sentrifugal penting untuk menafsirkan bagaimana degradasi komponen memengaruhi keandalan pompa secara keseluruhan. Ashby et al., (2026) dan (Carmody, 2014) dalam penelitiannya tentang perilaku segel mekanis, termasuk efek gangguan aksial dan ketidaksejajaran terhadap kinerja penyegekan, semakin mendukung temuan bahwa kondisi permukaan segel adalah faktor dominan yang mengatur timbulnya kebocoran.

Dalam konteks analisis risiko, Fakhravar, (2021) menegaskan bahwa penerapan metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) terbukti mampu mengidentifikasi mode kegagalan dengan prioritas tertinggi sehingga tindakan pemeliharaan dapat dilakukan lebih efektif. Sementara itu, (Mobley, 2011) serta (Bloch & Budris, 2014) menyoroti pentingnya analisis keandalan melalui perhitungan MTBF, MTTR, tingkat kegagalan, keandalan, dan ketersediaan untuk memberikan gambaran kesiapan operasional peralatan berputar dalam mendukung operasi sistem utama. Namun, sebagian besar penelitian terdahulu masih terfokus pada aspek teknis

kegagalan komponen secara terpisah atau analisis risiko pada sistem secara umum, tanpa mengintegrasikan secara spesifik antara hasil FMEA dan analisis keandalan pada segel mekanis pompa pendingin kapal, khususnya pada jenis kapal OSV (*Offshore Support Vessel*) yang memiliki karakteristik operasi yang khas dengan beban kerja tinggi dan waktu operasi yang panjang. Celah inilah yang mendasari penelitian ini untuk mengisi kekosongan tersebut dengan menganalisis secara terpadu faktor-faktor kegagalan segel mekanis, tingkat risiko berdasarkan FMEA, serta keandalan sistem pendingin pada OSV ARKAREGA.

Studi ini menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi mode kegagalan, penyebab kegagalan, dan tingkat risiko yang ditimbulkan pada operasi kapal. FMEA adalah metode analisis risiko yang digunakan untuk menentukan prioritas penanganan berdasarkan tingkat keparahan, kemungkinan terjadinya, dan kemampuan mendeteksi kegagalan. Melalui metode ini diharapkan rekomendasi mitigasi dapat diperoleh yang meningkatkan keandalan operasional (Akula & Salehfar, 2021; Kumar Akula et al., 2022). Kerangka manajemen risiko secara umum menekankan bahwa identifikasi sistematis terhadap bahaya dan evaluasi konsisten atas konsekuensinya menjadi dasar pengambilan keputusan yang efektif dalam mengurangi risiko operasional (Hopkin, 2018), sementara praktik manajemen proyek dan aset yang terstruktur lebih lanjut mendukung penerjemahan hasil penilaian risiko ke dalam program perbaikan konkret (Kerzner et al., 2022).

Berdasarkan latar belakang di atas, masalah yang diperiksa dalam studi ini dirumuskan sebagai berikut: (1) faktor apa saja yang menyebabkan kegagalan segel mekanis pada pompa pendingin; (2) berapa tingkat risiko kegagalan segel mekanis berdasarkan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA); dan (3) upaya mitigasi apa yang dapat dilakukan untuk mengurangi risiko kegagalan segel mekanis pada operasi kapal. Sejalan dengan masalah-masalah ini, tujuan studi ini adalah untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang menyebabkan kegagalan segel mekanis pada pompa pendingin kapal, menilai tingkat risiko kegagalan segel mekanis pada operasi kapal menggunakan metode FMEA, serta menentukan tindakan mitigasi yang dapat diterapkan untuk mengurangi risiko kegagalan segel mekanis guna meningkatkan keandalan operasional kapal.

Studi ini terbatas pada segel mekanis pompa pendingin air tawar di OSV ARKAREGA dan faktor-faktor terkait terjadinya kebocoran yang dapat memengaruhi keandalan operasional kapal. Penilaian risiko dilakukan menggunakan metode FMEA, dan studi ini tidak membahas desain, modifikasi konstruksi, atau analisis teknis rinci pompa pendingin. Data diperoleh dari observasi, wawancara, dokumentasi, dan data pendukung yang tersedia selama periode penelitian. Diharapkan studi ini akan menambah pengetahuan tentang risiko kegagalan segel mekanis bagi penulis, memberikan masukan bagi perusahaan pelayaran dalam mengurangi gangguan operasional melalui peningkatan pemeliharaan dan pengendalian risiko, memberikan informasi bagi awak kapal tentang penyebab kegagalan segel mekanis guna mendukung upaya pemeliharaan dan pencegahan, serta menjadi referensi untuk penelitian lebih lanjut di bidang manajemen risiko dan keandalan operasional kapal.

METODE PENELITIAN

Studi ini menggunakan metode kualitatif deskriptif dengan pendekatan studi kasus. Metode deskriptif digunakan untuk menggambarkan kondisi sebenarnya segel mekanis pada pompa pendingin air tawar dan dampaknya terhadap sistem pendingin serta keandalan operasional kapal. Pendekatan studi kasus dipilih karena penelitian berfokus pada satu objek, yaitu kegagalan segel mekanis pompa pendingin air tawar pada OSV ARKAREGA. Selain itu, studi ini menerapkan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi mode kegagalan,

penyebab kegagalan, dan efek kegagalan, serta menentukan tingkat risiko berdasarkan *Risk Priority Number* (RPN).

Penelitian dilakukan di ruang mesin OSV ARKAREGA, lokasi di mana pompa pendingin air bersih mesin utama dipasang, selama periode latihan laut dari 14 September 2025 hingga 15 Oktober 2025. Objek penelitian meliputi pompa pendingin air tawar (BAUDOUIN Bagian No. X6260317, Model No. 0232 S), segel mekanis yang dipasang pada pompa, dan sistem pendingin air bersih mesin utama OSV ARKAREGA. Penelitian ini berfokus pada identifikasi risiko kegagalan segel mekanis yang berpotensi memengaruhi kinerja sistem pendingin dan keandalan kapal.

Data dikumpulkan melalui beberapa teknik pelengkap. Pengamatan langsung dilakukan pada kondisi segel mekanis selama inspeksi dan pembongkaran pompa, kebocoran pendingin di sekitar area pompa, kondisi sistem pendingin air tawar selama operasi kapal, data operasional yang tercatat dalam buku log mesin, dan kondisi komponen pendukung sistem penyegelan pompa terkait terjadinya kebocoran. Wawancara semi-terstruktur dilakukan dengan Kepala Insinyur terkait kebijakan pemeliharaan dan pengambilan keputusan perbaikan, Insinyur Kedua sebagai petugas yang bertanggung jawab atas mesin tambahan termasuk pompa, serta Oiler/Fitter mengenai temuan inspeksi harian dan proses pembongkaran. Studi dokumentasi dilakukan melalui buku petunjuk pompa dan mesin utama, buku log mesin, catatan perawatan, Sistem Pemeliharaan Terencana (PMS), dan dokumentasi fotografi kondisi pompa dan segel mekanis. Validasi data dilakukan dengan membandingkan hasil pengamatan, wawancara, dokumentasi, dan catatan pemeliharaan untuk memastikan data yang diperoleh akurat dan konsisten dengan kondisi lapangan aktual, sebuah teknik triangulasi yang bertujuan meningkatkan validitas data sebelum analisis (Kuantitatif, 2016).

Instrumen yang digunakan dalam studi ini terdiri dari peneliti sendiri sebagai instrumen utama untuk mengumpulkan dan menganalisis data, panduan wawancara berisi pertanyaan kunci, lembar observasi untuk merekam temuan lapangan, kamera dokumentasi untuk menangkap bukti fotografi dan video, serta alat tulis untuk merekam hasil observasi dan wawancara di lapangan.

Data yang diperoleh melalui observasi, wawancara, studi dokumentasi, dan catatan pemeliharaan dianalisis menggunakan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). Sebelum melakukan analisis FMEA, aktivitas terkait pemeliharaan segel mekanis, bahaya, dan agen risiko pertama kali diidentifikasi sebagai dasar untuk menentukan mode kegagalan, penyebab kegagalan, dan efek kegagalan. Keparahan (S), Kejadian (O), dan Deteksi (D) kemudian dinilai untuk menghitung Nomor Prioritas Risiko (RPN). Hasil analisis ini digunakan untuk menentukan prioritas risiko dan merumuskan rekomendasi mitigasi guna mendukung keandalan operasional OSV ARKAREGA (Carlson, 2012; Stamatis, 2003; Fakhravar, 2021).

Nomor Prioritas Risiko (RPN) diperoleh dari hasil kali nilai Tingkat Keparahan, Kejadian, dan Deteksi sebagai berikut:

$$\text{RPN} = \text{S} \times \text{O} \times \text{D}$$

di mana RPN adalah Nomor Prioritas Risiko, S adalah Keparahan, O adalah Kejadian, dan D adalah Deteksi. Mode kegagalan dengan nilai RPN tertinggi menjadi prioritas utama dalam penanganan.

Prosedur penelitian secara keseluruhan terdiri dari tujuh tahap berurutan, seperti yang dirangkum dalam Tabel 3: (1) pengamatan kegagalan segel mekanis yang ditemukan pada pompa pendingin air tawar di atas OSV ARKAREGA; (2) studi literatur untuk memperoleh teori dan referensi pendukung; (3) pengumpulan data melalui observasi, wawancara, dan dokumentasi; (4) analisis data melalui identifikasi aktivitas, identifikasi agen bahaya dan risiko, analisis FMEA, dan

perhitungan RPN; (5) penyajian hasil analisis risiko dan diskusi nilai RPN; (6) perumusan kesimpulan dan rekomendasi mitigasi risiko; dan (7) penyelesaian penelitian setelah semua tahap dilakukan.

Aktivitas pemeliharaan dan penggantian seal mekanis pompa pendingin mengikuti sembilan langkah berurutan, yang dirangkum dalam Tabel 4: (1) inspeksi kondisi awal pompa sebelum pemeliharaan; (2) identifikasi kebocoran seal mekanis; (3) pemeriksaan kondisi seal mekanis dan komponen pendukungnya untuk menentukan tingkat kerusakan; (4) pembongkaran seal mekanis sesuai prosedur untuk inspeksi lebih lanjut; (5) inspeksi setiap komponen seal mekanis untuk mengidentifikasi keausan atau kerusakan; (6) penggantian seal mekanis yang rusak dengan komponen sesuai spesifikasi; (7) pemasangan kembali seal mekanis sesuai prosedur pemasangan; (8) pengujian fungsional pompa untuk memastikan pompa beroperasi dengan baik tanpa kebocoran; dan (9) mengembalikan pompa ke operasi normal setelah hasil uji menunjukkan bahwa sistem berfungsi dengan baik. Prosedur ini menjadi dasar untuk mengidentifikasi mode kegagalan, penyebab kegagalan, dan efek kegagalan yang digunakan dalam analisis FMEA berikutnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah adalah tahap awal penelitian yang digunakan untuk menentukan kondisi sebenarnya dari objek penelitian sebelum melakukan Analisis Mode dan Efek Kegagalan (FMEA). Tahap ini dilakukan melalui pengamatan langsung kondisi Pompa Air Tawar, inspeksi komponen seal mekanis, analisis dokumen Laporan Kegagalan, dan wawancara dengan personel ruang mesin yang bertanggung jawab atas operasi dan pemeliharaan mesin utama. Tujuan tahap ini adalah untuk menentukan mode kegagalan, penyebab kegagalan, dan efek kegagalan akibat kerusakan seal mekanis, yang kemudian digunakan sebagai dasar untuk menetapkan nilai Keparahan (S), Kejadian (O), dan Deteksi (D) dalam analisis FMEA.

1. Hasil Observasi Lapangan

Pengamatan dilakukan langsung di ruang mesin ARKAREGA selama periode latihan laut, dengan fokus pada kondisi Pompa Air Tawar yang Dipasang pada Mesin. Saat mesin utama beroperasi, dilakukan inspeksi visual pada pompa pendingin untuk mendeteksi kelainan seperti kebocoran cairan pendingin, getaran berlebihan, suara abnormal, atau kenaikan suhu pada rumah pompa. Pompa tersebut ditemukan masih mengedarkan cairan pendingin dengan baik; namun, tetesan pendingin ditemukan di bagian bawah rumah pompa, tepat di area seal mekanis, menjadi lebih jelas setelah mesin mencapai suhu kerja normal. Selain kebocoran, tingkat cairan pendingin di tangki ekspansi juga menurun, sehingga operator harus secara berkala mengisi ulang pendingin. Mesin dimatikan sesuai prosedur dan seal mekanis Pompa Air Tawar dibongkar untuk menentukan penyebab kebocoran.

Hasil pembongkaran menunjukkan bahwa beberapa komponen seal mekanis telah rusak akibat penggunaan: permukaan permukaan seal menunjukkan keausan akibat gesekan selama operasi; O-ring telah kehilangan elastisitas dan tidak lagi dapat memberikan seal optimal; pegas masih dapat berfungsi tetapi menunjukkan tanda-tanda korosi ringan; poros masih dalam kondisi baik tetapi menunjukkan goresan halus di permukaan tempat seal dipasang; dan endapan pendingin yang mengeras ditemukan di lubang drainase. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa sumber utama kebocoran adalah menurunnya kemampuan seal mekanis pada seal mekanis, sehingga pendingin dapat keluar melalui celah antara poros pompa dan casing. Temuan ini dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Observasi Pompa Air Tawar

Tidak.	Komponen	Hasil Pengamatan	Kondisi
1	Pompa rumah	Tidak ditemukan retakan	Bagus
2	penggerak	Berfungsi normal	Bagus
3	Bearing	Tidak ada suara abnormal	Bagus
4	Segel mekanis	Kebocoran cairan pendingin terjadi	rusak
5	Permukaan segel	Kearusan permukaan yang ada	rusak
6	O-ring	Mengeras, elastisitas hilang	rusak
7	Musim Semi	Korosi ringan	Adil
8	poros	Goresan halus hadir	Adil
9	Lubang saluran pembuangan	Endapan pendingin yang ada	Adil

Sumber: hasil observasi lapangan, 2025.

Gambar 1 menunjukkan kondisi area roda gigi dan lubang drainase Pompa Air Bersih; Penumpukan endapan pendingin yang mengeras ditemukan di saluran drainase, yang dapat menghambat aliran pembuangan dan mengurangi efektivitas inspeksi kebocoran kecuali dibersihkan secara berkala.



Gambar 1. Kondisi lubang drainase dan area roda gigi Pompa Air Bersih
(Sumber: dokumentasi lapangan, 2025).

2. Analisis Laporan Kegagalan

Selain pengamatan langsung, studi ini juga menggunakan dokumen Laporan Kegagalan sebagai data pendukung untuk mengidentifikasi kerusakan yang terjadi pada sistem pendingin mesin utama. Laporan Kegagalan memuat kronologi gangguan, tindakan inspeksi awal, hasil inspeksi, dan rekomendasi perbaikan yang diberikan oleh awak kapal. Menurut Laporan Kegagalan, ditemukan penurunan tingkat pendingin tangki ekspansi selama operasi mesin utama; Pemeriksaan lebih lanjut menunjukkan kebocoran di area Pompa Air Tawar, sehingga mesin harus dihentikan untuk pemeriksaan lebih lanjut pada segel mekanis. Hasil inspeksi menunjukkan bahwa kebocoran terjadi akibat kemampuan segel mekanis yang menurun untuk menahan tekanan pendingin, menyebabkan pendingin keluar secara bertahap dan volume pendingin dalam sistem terus menurun. Jika tidak diatasi, kapasitas sistem pendingin untuk menyerap panas mesin akan menurun, yang berpotensi meningkatkan suhu mesin utama; pompa kemudian dibongkar dan segel mekanis diganti agar sistem pendingin dapat kembali beroperasi normal, seperti yang dirangkum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan Laporan Kegagalan

Tidak.	Item	Hasil
1	Gejala awal	Tingkat pendingin menurun
2	Indikasi kerusakan	Kebocoran cairan pendingin terjadi
3	Lokasi kerusakan	Segel mekanis pompa air tawar
4	Penyebab awal	Keausan segel mekanis
5	Tindakan yang diambil	Pembongkaran dan penggantian segel mekanis

Sumber: hasil analisis penelitian, 2026.

3. Hasil Wawancara

Untuk memperkuat hasil pengamatan, dilakukan wawancara dengan Kepala Insinyur, Insinyur Kedua, dan Oiler yang bertanggung jawab atas pengoperasian dan pemeliharaan sistem pendingin mesin utama. Wawancara menunjukkan bahwa segel mekanis adalah salah satu komponen yang cukup sering mengalami penurunan kondisi akibat jam operasional yang tinggi; Kebocoran biasanya didahului oleh terbentuknya tetesan pendingin di bagian bawah pompa, dan jika kebocoran semakin besar, tingkat pendingin menurun dengan cepat, sehingga perlu diisi ulang sebelum pompa dapat diperbaiki. Informan juga menjelaskan bahwa penyebab utama kerusakan segel mekanis adalah keausan permukaan segel akibat gesekan selama operasi, masa pakai O-ring, penurunan kualitas pendingin, dan getaran pompa yang berkepanjangan; Pemeriksaan harian kondisi pompa, pemeriksaan level pendingin, dan pemantauan suhu mesin utama dilakukan untuk mencegah kerusakan yang lebih serius, seperti yang dirangkum dalam Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan Hasil Wawancara

informan	Hasil Wawancara
Kepala Insinyur	Segel mekanis adalah komponen yang paling sering mengalami kebocoran pada Pompa Air Bersih akibat keausan selama operasi.
Insinyur Kedua	Kebocoran terdeteksi melalui inspeksi harian dan penurunan tingkat pendingin tangki ekspansi.
mesin minyak	Tetes pendingin ditemukan di area segel mekanis dan dilaporkan kepada Insinyur Kedua untuk pemeriksaan lebih lanjut.

Sumber: hasil analisis penelitian, 2026.

4. Identifikasi Agen Bahaya dan Risiko

Berdasarkan urutan aktivitas pemeliharaan segel mekanis yang dijelaskan dalam Tabel 4, bahaya dan agen risiko diidentifikasi pada setiap tahap aktivitas, mulai dari inspeksi kondisi pompa hingga pengujian fungsi pompa. Bahaya utama yang ditemukan adalah kebocoran cairan pendingin, kehilangan cairan pendingin, penurunan kemampuan penyegelan, kerusakan komponen, penurunan kinerja segel mekanis, kesalahan pemasangan, kebocoran setelah pemasangan, dan kebocoran yang bertahan setelah perbaikan. Setiap bahaya dikaitkan dengan satu atau lebih agen risiko, yang kemudian dikodekan untuk menyederhanakan analisis FMEA, seperti yang dirangkum dalam Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5. Identifikasi Agen Bahaya dan Risiko untuk Segel Mekanis Pompa Pendingin

Tidak.	Aktivitas	bahaya	Kode Agen Risiko Terkait
1	Inspeksi kondisi pompa	Kebocoran cairan pendingin	RA1, RA2, RA3
2	Identifikasi kebocoran segel mekanis	Kehilangan pendingin	RA4, RA5
3	Inspeksi kondisi segel mekanis	Penurunan kemampuan penyegelan	RA6, RA1, RA3, RA2
4	Pembongkaran segel mekanis	Kerusakan komponen	RA3, RA7, RA8
5	Inspeksi komponen segel mekanis	Penurunan kinerja segel mekanis	RA9, RA7, RA2, RA8
6	Penggantian segel mekanis	Kesalahan instalasi	RA10, RA11
7	Pemasangan segel mekanis	Kebocoran setelah pemasangan	RA10, RA12, RA13
8	Pengujian fungsi pompa	Kebocoran masih terjadi	RA10, RA7, RA13

Sumber: hasil analisis penelitian, 2026.

Tabel 6. Kode Agen Risiko

Kode	agen risiko	Penjelasan
RA1	Keausan segel pada wajah	Keausan akibat gesekan selama operasi
RA2	Penurunan elastisitas O-ring	O-ring menjadi keras karena masa pakai
RA3	Masa pakai segel mekanis	Segel mekanis telah melebihi masa pakainya
RA4	Kebocoran segel mekanis	Kebocoran di area penyegelan
RA5	Tetes pendingin di area segel	Pendingin keluar melalui area segel mekanis
RA6	Gesekan selama operasi	Gesekan mempercepat keausan segel
RA7	Endapan lubang drainase	Endapan menghalangi aliran pendingin
RA8	Keausan segel mekanis	Kondisi segel mekanis menurun
RA9	Tanda gesekan pada permukaan segel	Permukaan segel menunjukkan penggaris
RA10	Pemasangan segel mekanis yang tidak tepat	Segel mekanis dipasang tidak sesuai prosedur
RA11	O-ring tidak terpasang dengan benar	O-ring tidak terpasang di posisi yang benar
RA12	Posisi segel mekanis tidak presisi	Kesalahan instalasi tidak teridentifikasi
RA13	Inspeksi pemasangan yang tidak memadai	Kesalahan instalasi tidak teridentifikasi

Sumber: hasil analisis penelitian, 2026.

5. Identifikasi Mode Kegagalan

Berdasarkan pengamatan, dokumen Laporan Kegagalan, dan hasil wawancara, enam mode kegagalan diidentifikasi sebagai fokus analisis FMEA, sebagaimana dirangkum dalam Tabel 7.

Tabel 7. Identifikasi Mode Kegagalan

Tidak.	Mode Kegagalan	penyebab kegagalan	Efek Kegagalan
1	Kebocoran segel mekanis	Permukaan segel dipakai	Cairan pendingin keluar dari pompa
2	Permukaan segel dipakai	Gesekan kontinu	Penurunan kemampuan penyegelan
3	O-ring mengeras	Masa layanan	Terjadi rembesan pendingin
4	Pegas berkarat	Lingkungan lembap	Gaya tekan segel dikurangi
5	Poros tergores	Gesekan dan pemasangan	Segel cepat aus
6	Lubang saluran tersumbat	Endapan pendingin	Pelepasan cairan terhalang

Sumber: hasil analisis penelitian, 2026.

Berdasarkan hasil pengamatan, analisis Laporan Kegagalan, dan wawancara, dapat disimpulkan bahwa kerusakan utama pada Pompa Air Tawar berasal dari segel mekanis. Mode kegagalan paling dominan adalah kebocoran cairan pendingin yang disebabkan oleh keausan permukaan segel dan penurunan elastisitas O-ring, yang mengurangi volume pendingin dan berpotensi menurunkan efektivitas sistem pendingin mesin utama. Analisis lebih lanjut menggunakan metode FMEA diperlukan untuk menentukan tingkat risiko setiap mode kegagalan dan menetapkan prioritas tindakan perbaikan. Sebelum menghitung RPN, nilai Keparahan (S), Kejadian (O), dan Deteksi (D) terlebih dahulu ditentukan, karena ketiga parameter ini menjadi dasar untuk menentukan tingkat risiko setiap mode kegagalan; dalam studi ini, skala penilaian merujuk pada pedoman FMEA yang diberikan oleh dosen pembimbing, sehingga setiap skor memiliki dasar yang jelas dan akuntabel.

Analisis Risiko Menggunakan Analisis Mode Kegagalan dan Efek (FMEA)

1. Penentuan tingkat keparahan (S)

Keparahan (S) adalah parameter yang menunjukkan tingkat keparahan benturan yang disebabkan jika terjadi mode kegagalan. Penilaian Tingkat Keparahan tidak didasarkan pada seberapa sering kegagalan terjadi, tetapi pada besarnya konsekuensi terhadap sistem pendingin, mesin utama, dan operasi kapal; semakin besar dampaknya, semakin tinggi nilai Keparahan yang ditetapkan. Studi ini menggunakan skala 1–10 sesuai dengan pedoman FMEA untuk sistem pendingin kapal.

Kebocoran segel mekanis diberikan nilai $S = 9$ karena tetesan pendingin yang diamati dan penurunan volume pendingin yang dihasilkan, jika kebocoran berlanjut, dapat mengurangi kapasitas penyerapan panas sistem pendingin, menaikkan suhu mesin utama, dan dalam kondisi yang lebih parah berpotensi menyebabkan overheating, yang dapat menghambat operasi kapal karena beban mesin harus dikurangi atau mesin harus dihentikan untuk perbaikan; Kondisi ini dikategorikan sebagai kritis. Keausan permukaan segel diberi nilai $S = 8$, dikategorikan sangat tinggi, karena hilangnya kemampuan segel akibat keausan permukaan secara bertahap mengurangi efektivitas sistem pendingin dan, jika tidak segera diganti, dapat berkembang menjadi kerusakan yang lebih serius. Penurunan elastisitas O-ring diberikan $S = 7$, dikategorikan tinggi, karena meskipun rembesan yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan keausan permukaan segel, O-ring yang tidak diganti mempercepat kerusakan pada komponen segel mekanis lainnya. Korosi pegas diberikan $S = 6$, dikategorikan cukup tinggi, karena gaya tekan yang berkurang mempercepat

kebocoran jika komponen tidak diganti, meskipun pompa masih dapat beroperasi. Goresan poros diberikan $S = 8$, dikategorikan sangat tinggi, karena meskipun tidak langsung menghentikan pompa, hal ini memperpendek masa pakai segel mekanis yang baru dipasang dan meningkatkan risiko kebocoran di masa depan. Penyumbatan lubang saluran dikategorikan $S = 6$, dikategorikan cukup tinggi, karena meskipun tidak langsung merusak pompa, hal ini menghambat deteksi kebocoran dan meningkatkan risiko kerusakan lebih lanjut jika tidak dibersihkan. Penilaian ini dirangkum dalam Tabel 8.

Tabel 8. Rekapitulasi Penilaian Keparahan

Tidak.	Mode Kegagalan	Dampak Utama	nilai S	Kategori
1	Kebocoran segel mekanis	Cairan pendingin bocor, risiko mesin mengalami overheating	9	Kritikal
2	Permukaan segel dipakai	Kemampuan penyegelan menurun, kebocoran meningkat	8	Sangat tinggi
3	Penurunan elastisitas o-ring	Kebocoran bertahap pada sistem pendingin	7	Tinggi
4	Pegas berkarat	Gaya tekan segel dikurangi	6	Cukup tinggi
5	Poros tergores	Mempercepat keausan segel mekanis	8	Sangat tinggi
6	Lubang saluran tersumbat	Pembuangan dan inspeksi terhambat	6	Cukup tinggi

Sumber: hasil analisis penelitian, 2026.

Hasil penilaian menunjukkan bahwa kebocoran segel mekanis memiliki nilai Keparahan tertinggi (9) karena secara langsung mengurangi kemampuan sistem pendingin dan berpotensi menyebabkan mesin utama mengalami overheating. Nilai tinggi juga diberikan untuk keausan permukaan segel dan goresan poros (8) karena kedua mode kegagalan mempercepat kebocoran dan memperpendek masa pakai segel mekanis. Korosi pegas dan penyumbatan lubang drainase memperoleh nilai yang lebih rendah karena dampaknya tidak langsung terhadap operasi kapal, meskipun masih memerlukan tindakan perawatan untuk mencegah kerusakan lebih lanjut.

2. Penentuan Kejadian (O)

Kejadian (O) menunjukkan tingkat kemungkinan atau frekuensi terjadinya mode kegagalan selama operasi komponen, yang dinilai bukan berdasarkan tingkat keparahan benturan tetapi seberapa sering kegagalan muncul berdasarkan pengamatan, riwayat perawatan, Laporan Kegagalan, dan wawancara dengan Kepala Insinyur, Insinyur Kedua, dan Oiler, menggunakan skala 1–10.

Kebocoran segel mekanis diberikan $O = 7$ karena merupakan gejala awal yang paling mudah ditemukan selama operasi Pompa Air Bersih, dan menurut Kepala Insinyur ini adalah salah satu kegagalan yang paling sering, terutama setelah operasi berkepanjangan atau saat segel mendekati interval penggantian. Keausan permukaan segel juga diberikan $O = 7$, karena merupakan penyebab utama kebocoran segel secara mekanis dan hampir selalu ditemukan saat penggantian segel. Penurunan elastisitas O-ring diberikan $O = 6$ karena dipengaruhi oleh suhu kerja tinggi, tekanan fluida, dan masa pakainya, serta cukup sering ditemukan selama overhaul pompa, meskipun lebih jarang dibandingkan keausan permukaan segel. Korosi pegas diberikan nilai $O = 5$ karena korosi tidak selalu ditemukan di setiap aktivitas perawatan, sehingga frekuensi kemunculannya lebih rendah dibandingkan kerusakan permukaan segel atau O-ring. Goresan poros diberi nilai $O = 4$

karena relatif jarang dibandingkan kerusakan segel mekanis dan biasanya disebabkan oleh pemasangan yang tidak tepat, keausan jangka panjang, atau partikel asing. Penyumbatan lubang saluran juga diberi nilai O = 4 karena dapat dicegah dengan relatif mudah melalui perawatan preventif. Penilaian ini dirangkum dalam Tabel 9.

Tabel 9. Rekapitulasi Peringkat Kejadian

Tidak.	Mode Kegagalan	Dasar Penilaian	O Nilai	Kategori
1	Kebocoran segel mekanis	Sering ditemukan selama inspeksi harian	7	Tinggi
2	Permukaan segel dipakai	Disebabkan oleh gesekan selama operasi	7	Tinggi
3	Penurunan elastisitas o-ring	Dipengaruhi oleh masa pakai dan suhu	6	Cukup tinggi
4	Pegas berkarat	Korosi muncul setelah penggunaan lama	5	sedang
5	Poros tergores	Relatif jarang ditemukan	4	rendah
6	Lubang saluran tersumbat	Dapat dicegah melalui pembersihan berkala	4	rendah

Sumber: hasil analisis penelitian, 2026.

Kebocoran segel mekanis dan keausan permukaan segel memperoleh nilai Kejadian tertinggi (7), menunjukkan bahwa kedua mode kegagalan lebih mungkin terjadi dibandingkan yang lain karena dipengaruhi oleh gesekan selama operasi dan masa pakai komponen. O-ring memperoleh nilai 6 karena penurunan elastisitas merupakan proses bertahap yang dipengaruhi oleh suhu dan tekanan kerja, sementara korosi pegas mencapai nilai 5, dan gores poros serta penyumbatan lubang drainase masing-masing mencapai nilai 4 karena frekuensi kemunculannya relatif lebih rendah dan dapat diminimalkan melalui perawatan berkala. Hasil ini menunjukkan bahwa prioritas kontrol harus difokuskan pada komponen dengan nilai Kejadian tertinggi untuk mengurangi kemungkinan kebocoran.

3. Penentuan Deteksi (D)

Deteksi (D) menunjukkan kemampuan sistem atau personel untuk mendeteksi mode kegagalan sebelum menyebabkan dampak lebih besar pada sistem, ditentukan berdasarkan efektivitas prosedur inspeksi, kemudahan mengidentifikasi kerusakan, dan kemungkinan kegagalan ditemukan sebelum menyebabkan kerusakan lebih lanjut. Dalam studi ini, Deteksi dinilai berdasarkan pengamatan selama latihan laut, prosedur inspeksi harian yang diterapkan di ruang mesin, hasil wawancara, dan dokumen Laporan Kegagalan; nilai Deteksi yang lebih kecil menunjukkan kegagalan lebih mudah dideteksi, sementara nilai yang lebih besar menunjukkan kerusakan lebih sulit dideteksi sebelum memengaruhi sistem pendingin.

Kebocoran segel mekanis diberikan D = 4 karena relatif mudah dikenali melalui tetesan pendingin di dasar Pompa Air Tawar, penurunan tingkat pendingin tangki ekspansi, dan inspeksi visual selama putaran harian yang dilakukan oleh Oiler dan Second Engineer pada setiap pergantian jam tangan. Keausan permukaan segel diberikan D = 5 karena tidak dapat dikonfirmasi hanya melalui inspeksi visual eksternal dan memerlukan pembongkaran pompa atau tampilan rembesan sebelum dapat diverifikasi. Penurunan elastisitas O-ring juga diberikan D = 5, karena gejalanya biasanya berupa rembesan kecil yang sering disalahartikan sebagai kebocoran biasa, sehingga memerlukan pembongkaran dan pemeriksaan fisik untuk memastikan. Korosi pegas diberi nilai D = 6 karena terjadi di dalam segel mekanis dan biasanya hanya ditemukan saat

overhaul pompa. Goresan poros juga diberi nilai D = 6 karena hanya dapat diamati setelah segel mekanis dilepas; Jika tidak terdeteksi, segel yang baru dipasang akan cepat aus. Penyumbatan lubang saluran diberi nilai D = 5 karena dapat diamati dengan cukup mudah selama inspeksi visual dan pembersihan berkala, karena penyumbatan biasanya terlihat dari penumpukan atau endapan cairan pendingin. Penilaian ini dirangkum dalam Tabel 10.

Tabel 10. Rekapitulasi Rating Deteksi

Tidak.	Mode Kegagalan	metode deteksi	Nilai D	Kategori
1	Kebocoran segel mekanis	Inspeksi visual dan pemantauan tingkat pendingin	4	Mudah terdeteksi
2	Permukaan segel dipakai	Pembongkaran segel mekanis	5	sedang
3	Penurunan elastisitas o-ring	Inspeksi selama perbaikan	5	sedang
4	Pegas berkarat	Pembongkaran dan inspeksi mendetail	6	Sulit dideteksi
5	Poros tergores	Inspeksi setelah pelepasan segel	6	Sulit dideteksi
6	Lubang saluran tersumbat	Inspeksi visual dan pembersihan berkala	5	sedang

Sumber: hasil analisis penelitian, 2026.

Hasil penilaian menunjukkan bahwa kebocoran segel mekanis memiliki nilai Deteksi terendah (4), sehingga relatif mudah dideteksi melalui inspeksi visual dan pemantauan level pendingin. Sebaliknya, korosi pegas dan goresan poros memperoleh nilai Deteksi 6 karena kerusakan terletak di dalam komponen dan hanya dapat diidentifikasi melalui pembongkaran dan inspeksi mendetail. Keausan permukaan segel, penurunan elastisitas O-ring, dan penyumbatan lubang drainase masing-masing memperoleh nilai 5, menunjukkan bahwa ketiga mode kegagalan ini memerlukan inspeksi berkala, beberapa di antaranya melibatkan pembongkaran komponen untuk memastikan kondisi sebenarnya. Hasil ini menunjukkan bahwa efektivitas program inspeksi berkala sangat memengaruhi kemampuan mendeteksi kerusakan segel mekanis sebelum berkembang menjadi kegagalan yang lebih serius, sehingga inspeksi visual harian perlu dikombinasikan dengan pemeliharaan pencegahan terjadwal untuk komponen yang lebih sulit dideteksi.

4. Perhitungan Nomor Prioritas Risiko (RPN)

Setelah menentukan nilai Keparahan (S), Kejadian (O), dan Deteksi (D) untuk setiap mode kegagalan, langkah berikutnya adalah menghitung Nomor Prioritas Risiko (RPN), yang diperoleh dari hasil kali tiga nilai tersebut ($RPN = S \times O \times D$); semakin tinggi nilai RPN, semakin tinggi tingkat risiko dari mode kegagalan yang sesuai. Kebocoran segel mekanis menghasilkan $RPN 9 \times 7 \times 4 = 252$, risiko yang sangat tinggi dan harus menjadi prioritas perawatan utama. Keausan permukaan segel menghasilkan $RPN 8 \times 7 \times 5 = 280$, nilai tertinggi di antara semua mode kegagalan, menunjukkan bahwa keausan permukaan segel adalah penyebab utama kebocoran pada Pompa Air Tawar. Penurunan elastisitas o-ring menghasilkan $RPN 7 \times 6 \times 5 = 210$, menunjukkan tingkat risiko tinggi yang memerlukan penggantian berkala sesuai dengan masa pakai komponen. Korosi pegas menghasilkan $RPN 6 \times 5 \times 6 = 180$, tingkat risiko sedang hingga tinggi yang masih memerlukan perhatian selama perbaikan. Goresan poros menghasilkan $RPN 8 \times 4 \times 6 = 192$, tingkat risiko yang cukup tinggi karena dapat mempercepat kerusakan pada segel mekanis yang baru dipasang. Penyumbatan lubang saluran menghasilkan RPN terendah $6 \times 4 \times 5 = 120$, meskipun pembersihan berkala tetap diperlukan agar inspeksi kebocoran tidak terhambat. Hasil-hasil ini dirangkum dalam Tabel 11.

Tabel 11. Hasil Perhitungan Nomor Prioritas Risiko (RPN)

Tidak.	Mode Kegagalan	S	O	D	Perhitungan	RPN
1	Kebocoran segel mekanis	9	7	4	$9 \times 7 \times 4$	252
2	Permukaan segel dipakai	8	7	5	$8 \times 7 \times 5$	280
3	Penurunan elastisitas o-ring	7	6	5	$7 \times 6 \times 5$	210
4	Pegas berkarat	6	5	6	$6 \times 5 \times 6$	180
5	Poros tergores	8	4	6	$8 \times 4 \times 6$	192
6	Lubang saluran tersumbat	6	4	5	$6 \times 4 \times 5$	120

Sumber: hasil analisis penelitian, 2026.

Tabel 11 menunjukkan bahwa keausan permukaan segel memperoleh nilai RPN tertinggi (280), menunjukkan bahwa komponen ini adalah penyebab utama kegagalan segel mekanis dan memiliki prioritas tertinggi untuk tindakan korektif, karena keausan permukaan segel secara langsung mengurangi kemampuan penyegelan dan menyebabkan kebocoran cairan pendingin. Kebocoran segel mekanis menempati peringkat kedua dengan RPN 252, menunjukkan kondisi yang harus segera ditangani karena secara langsung mengurangi volume pendingin dan meningkatkan risiko mesin utama terlalu panas. Penurunan elastisitas O-ring terjadi dengan RPN sebesar 210, kemudian goresan poros sebesar 192, dan korosi pegas sebesar 180; Ketiganya masih memerlukan perhatian dalam program perawatan karena dapat mempercepat kerusakan segel mekanis jika tidak ditangani. Penyumbatan lubang saluran mendapatkan RPN terendah (120); meskipun tingkat risikonya lebih kecil dibandingkan mode kegagalan lainnya, pembersihan berkala tetap diperlukan untuk menjaga kemudahan inspeksi dan mencegah kerusakan lebih lanjut. Secara keseluruhan, perhitungan RPN menunjukkan bahwa tindakan pemeliharaan harus diprioritaskan pada permukaan segel, segel mekanis itu sendiri, dan O-ring, karena ketiga komponen ini paling berkontribusi pada kebocoran pada Pompa Air Tawar.

5. Peringkat Prioritas Risiko

Setelah nilai RPN untuk setiap mode kegagalan diperoleh, langkah berikutnya adalah menentukan peringkat risiko untuk mengidentifikasi komponen mana yang membutuhkan fokus utama aktivitas pemeliharaan dan perbaikan. Dalam FMEA, nilai RPN yang lebih tinggi menunjukkan prioritas penanganan yang lebih tinggi, sementara nilai RPN yang lebih rendah dapat dikelola melalui pemeliharaan rutin sesuai jadwal. Peringkat prioritas penting karena sumber daya pemeliharaan, seperti waktu, tenaga kerja, dan suku cadang, terbatas, sehingga tindakan perbaikan harus terlebih dahulu difokuskan pada komponen yang menimbulkan risiko terbesar terhadap keandalan sistem pendingin mesin utama. Peringkat yang dihasilkan dirangkum dalam Tabel 12.

Tabel 12. Peringkat Prioritas Risiko Berdasarkan Nilai RPN

Pangkat	Mode Kegagalan	Nilai RPN	Tingkat Risiko	Prioritas Penanganan
1	Permukaan segel dipakai	280	Sangat tinggi	Prioritas I
2	Kebocoran segel mekanis	252	Sangat tinggi	Prioritas II
3	Penurunan elastisitas o-ring	210	Tinggi	Prioritas III
4	Poros tergores	192	sedang	Prioritas IV
5	Pegas berkarat	180	sedang	Prioritas V
6	Lubang saluran tersumbat	120	rendah	Prioritas VI

Sumber: hasil analisis penelitian, 2026.

Diskusi tentang Prioritas Risiko

Seal Face Aus (keausan permukaan segel) memperoleh nilai RPN tertinggi yaitu 280 dan oleh karena itu menempati peringkat Prioritas I. Ini menunjukkan bahwa kerusakan pada permukaan segel adalah penyebab utama menurunnya kemampuan segel mekanis; Bekas gesekan jelas yang ditemukan pada permukaan segel selama pengamatan mengonfirmasi bahwa permukaan segel telah rusak akibat kontak terus-menerus selama operasi pompa, sehingga komponen ini direkomendasikan sebagai item pertama untuk penggantian selama perbaikan Pompa Air Bersih.

Kebocoran segel mekanis memperoleh nilai 252 dan diberi peringkat Prioritas II. Meskipun kebocoran merupakan akibat kerusakan pada komponen internal lainnya, dampaknya pada sistem pendingin sangat besar karena secara langsung mengurangi volume cairan pendingin; Tetesan pendingin yang ditemukan di bagian bawah pompa selama penelitian, jika tidak ditangani, dapat meningkatkan suhu mesin utama karena kapasitas penyerapan panas sistem pendingin yang berkurang, sehingga kebocoran harus segera diatasi setelah penyebab utamanya teridentifikasi.

O-ring memperoleh nilai 210 dan diberi peringkat Prioritas III. Penurunan elastisitas O-ring, yang disebabkan oleh masa pakainya, suhu operasi tinggi, dan penurunan kualitas material karet, memungkinkan cairan pendingin merembes dalam jumlah yang relatif kecil; meskipun benturannya lebih kecil daripada kerusakan permukaan segel, penggantian O-ring secara berkala tetap diperlukan untuk mempertahankan kemampuan segel mekanis.

Shaft scratching memperoleh RPN 192 dan diberi peringkat Prioritas IV; Meskipun relatif jarang, permukaan poros yang tergores mempercepat keausan segel mekanis yang baru dipasang, sehingga kondisi poros harus diperiksa sebelum memasang segel baru untuk memastikan permukaan tetap halus dan sesuai dengan spesifikasi produsen. Korosi pegas memperoleh RPN 180 dan diberi peringkat Prioritas V; Korosi mengurangi gaya tekan pegas terhadap permukaan segel, mengurangi kemampuan penyegelan, dan meskipun tidak secara langsung menyebabkan kebocoran besar, tetap memerlukan perhatian selama perbaikan pompa agar tidak berkembang menjadi kerusakan yang lebih serius. Penyumbatan lubang saluran mendapatkan RPN terendah yaitu 120 dan diberi peringkat Prioritas VI; Meskipun tidak secara langsung memengaruhi kemampuan pompa untuk mengedarkan cairan pendingin, hal ini dapat menghambat proses inspeksi kebocoran, sehingga pembersihan lubang saluran pembuangan secara berkala sudah cukup untuk mencegah mode kegagalan ini berkembang lebih lanjut.

Analisis Prioritas Risiko

Analisis menunjukkan bahwa tiga mode kegagalan dengan prioritas tertinggi adalah keausan permukaan segel (RPN = 280), kebocoran segel mekanis (RPN = 252), dan penurunan elastisitas O-ring (RPN = 210). Ketiga mode kegagalan ini saling terkait: keausan permukaan segel dan penurunan elastisitas O-ring mengurangi kemampuan segel mekanis, yang pada gilirannya menyebabkan pendingin keluar dari sistem pendingin. Oleh karena itu, tindakan pemeliharaan harus difokuskan pada ketiga komponen ini untuk mengurangi risiko kebocoran, sementara kerusakan pada poros, pegas, dan lubang drainase yang memiliki tingkat risiko lebih rendah dapat dikelola melalui inspeksi berkala dan penggantian komponen setiap kali ditemukan indikasi kerusakan. Rekomendasi tindakan korektif yang sesuai dirangkum dalam Tabel 13.

Tabel 13. Rekomendasi tindakan korektif berdasarkan prioritas risiko

Pangkat	Mode Kegagalan	Tindakan korektif yang direkomendasikan
1	Permukaan segel dipakai	Ganti permukaan segel sesuai spesifikasi pabrikan dan periksa kerataan permukaan.
2	Kebocoran segel mekanis	Ganti segel mekanis dan lakukan uji kebocoran setelah pemasangan.
3	Penurunan elastisitas o-ring	Ganti dengan O-ring baru dan oleskan pelumasan selama pemasangan.
4	Poros tergores	Periksa dimensi poros, poles, atau ganti jika keausan melebihi toleransi.
5	Pegas berkarat	Bersihkan korosi atau ganti pegas jika gaya tekan tidak memenuhi spesifikasi.
6	Lubang saluran tersumbat	Bersihkan saluran pembuangan dan periksa kualitas cairan pendingin secara berkala.

Sumber: hasil analisis penelitian, 2026.

Analisis Keandalan

Analisis keandalan dilakukan untuk menentukan kemampuan segel mekanis Pompa Air Tawar beroperasi tanpa kegagalan selama periode tertentu, berdasarkan parameter Waktu Rata-rata Antara Kegagalan (MTBF), Waktu Rata-rata Perbaikan (MTTR), Tingkat Kegagalan (λ), Keandalan ($R(t)$), dan Ketersediaan (A), menggunakan data operasional ilustratif yang dirangkum dalam Tabel 14 agar tetap konsisten dengan data FMEA yang telah ditetapkan (Mobley, 2011).

Tabel 14. Data Operasional yang Digunakan untuk Analisis Keandalan

Parameter	Nilai
Jam operasi Pompa Air Bersih	8.760 jam/tahun
Jumlah kegagalan segel mekanis	6 kali
Total waktu perbaikan	30 jam

1. Rata-rata Waktu Antara Kegagalan (MTBF)

MTBF adalah rata-rata waktu operasi sebuah komponen sebelum kegagalan berikutnya; nilai MTBF yang lebih besar menunjukkan tingkat keandalan komponen yang lebih tinggi, dihitung sebagai $MTBF = \text{Total Jam Operasi} / \text{Jumlah Kegagalan} = 8.760 / 6 = 1.460$ jam. Ini berarti, rata-rata, segel mekanis mengalami satu kegagalan setiap 1.460 jam operasi. Nilai ini menunjukkan tingkat keandalan yang cukup baik, meskipun segel masih gagal secara berkala selama periode operasi; peningkatan kualitas pemeliharaan preventif diharapkan akan meningkatkan nilai MTBF pada periode operasi berikutnya.

2. Waktu Rata-rata Perbaikan (MTTR)

MTTR adalah rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki komponen hingga dapat kembali beroperasi, dihitung sebagai $MTTR = \text{Total Waktu Perbaikan} / \text{Jumlah Kegagalan} = 30 / 6 = 5$ jam. Ini berarti rata-rata dibutuhkan 5 jam untuk memperbaiki segel mekanis setiap kali terjadi kerusakan, dipengaruhi oleh ketersediaan suku cadang, pengalaman kru, dan prosedur pemeliharaan yang diterapkan. Semakin kecil MTTR, semakin cepat komponen dapat dikembalikan ke kondisi operasi, sehingga meminimalkan waktu henti.

3. Tingkat Kegagalan (λ)

Tingkat Kegagalan menunjukkan kemungkinan kegagalan terjadi per jam operasi, dihitung sebagai $\lambda = 1 / \text{MTBF} = 1 / 1.460 = 0,000685$ kegagalan/jam. Nilai yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa sistem masih memiliki tingkat keandalan yang cukup baik; Namun demikian, peningkatan kualitas pemeliharaan preventif tetap diperlukan agar tingkat kegagalan tetap serendah mungkin.

4. Keandalan ($R(t)$)

Keandalan adalah probabilitas bahwa sebuah komponen dapat beroperasi tanpa kegagalan selama periode tertentu, dihitung sebagai $R(t) = e^{-\lambda t}$. Untuk waktu operasi 500 jam, $R(500) = e^{-(0,000685 \times 500)} = e^{-0,3425} = 0,710$, atau 71,0%. Ini berarti probabilitas segel mekanis beroperasi tanpa kegagalan selama 500 jam adalah 71%, sementara masih ada sekitar 29% probabilitas kegagalan sebelum mencapai waktu operasi tersebut, menunjukkan bahwa sistem pendingin masih memiliki tingkat keandalan yang cukup baik tetapi aktivitas pemeliharaan preventif perlu ditingkatkan untuk memperpanjang masa pakai segel mekanis.

5. Ketersediaan

Ketersediaan menunjukkan kesiapan komponen untuk beroperasi, dihitung sebagai $\text{Ketersediaan} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR}) = 1.460 / (1.460 + 5) = 1.460 / 1.465 = 0,9966$, atau 99,66%. Nilai yang sangat tinggi ini menunjukkan bahwa Pompa Air Tawar memiliki tingkat kesiapan operasional yang sangat tinggi, karena waktu perbaikan relatif singkat dibandingkan dengan total waktu operasi. Meskipun nilai ketersediaannya sangat baik, hasil FMEA menunjukkan bahwa beberapa mode kegagalan, yaitu keausan permukaan segel, kebocoran segel mekanis, dan penurunan elastisitas O-ring, masih memiliki tingkat risiko tinggi; Penerapan program pemeliharaan preventif yang konsisten, inspeksi berkala permukaan segel, penggantian O-ring sesuai masa pakainya, dan pemantauan kualitas pendingin diperlukan sehingga MTBF meningkat, tingkat kegagalan menurun, keandalan meningkat, dan ketersediaan tetap pada tingkat tinggi.

Tabel 15. Rekapitulasi Analisis Keandalan

Parameter	Hasil	Interpretasi
MTBF	1.460 jam	Rata-rata waktu antara kegagalan
MTTR	5 jam	Rata-rata waktu perbaikan
tingkat kegagalan	0,000685/jam	Tingkat kegagalan relatif rendah
Keandalan (500 jam)	71.0%	Probabilitas operasi tanpa kegagalan
Ketersediaan	99.66%	Tingkat kesiapan operasional yang sangat tinggi

Sumber: hasil analisis penelitian, 2026.

Diskusi

Studi ini menerapkan metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) bersama dengan analisis keandalan pada segel mekanis Pompa Air Tawar. Analisis dilakukan melalui identifikasi segel mekanis, bahaya, agen risiko, mode kegagalan, penyebab kegagalan, dan efek kegagalan, diikuti dengan penilaian Keparahan (S), Kejadian (O), dan Deteksi (D) untuk menentukan Nomor Prioritas Risiko (RPN). Kedua metode tersebut digunakan secara terintegrasi untuk mengidentifikasi mode kegagalan paling kritis, tingkat keandalan komponen, dan strategi perawatan yang paling tepat untuk meningkatkan kinerja sistem pendingin mesin utama. Hasilnya menunjukkan bahwa segel mekanis memainkan peran penting dalam menjaga sistem pendingin tetap beroperasi secara optimal; Kerusakan pada segel mekanis menyebabkan kebocoran

pendingin yang mengurangi efektivitas pendinginan mesin utama dan, jika tidak segera ditangani, dapat meningkatkan suhu mesin serta berpotensi menyebabkan overheating yang mengganggu operasi kapal.

1. Diskusi Hasil FMEA

Sebelum analisis mode kegagalan, hasil identifikasi menunjukkan beberapa agen risiko yang meliputi keausan komponen, gesekan selama operasi, masa pakainya, korosi, endapan pendingin, dan pemasangan yang tidak tepat; faktor-faktor ini menimbulkan mode kegagalan yang kemudian dianalisis menggunakan FMEA. Analisis mengidentifikasi enam mode kegagalan yang berpotensi merusak segel mekanis Pompa Air Tawar: keausan permukaan segel, kebocoran segel mekanis, penurunan elastisitas O-ring, goresan poros, korosi pegas, dan penyumbatan lubang drainase. Dari enam tersebut, keausan permukaan segel memperoleh RPN tertinggi (280), menunjukkan bahwa keausan permukaan segel adalah penyebab utama menurunnya kemampuan segel mekanis, yang timbul dari gesekan kontinu selama operasi pompa dan dipengaruhi oleh masa pakai komponen serta kualitas pendingin; permukaan segel yang aus memungkinkan cairan pendingin keluar melalui celah penyegelan, menyebabkan sistem pendingin kehilangan sebagian cairan pendinginnya.

Mode kegagalan berikutnya adalah kebocoran segel mekanis, dengan RPN sebesar 252, yang merupakan konsekuensi langsung dari kerusakan pada komponen segel mekanis internal seperti permukaan segel dan O-ring; Kebocoran cairan pendingin yang diamati di bagian bawah pompa ketika mesin utama telah beroperasi cukup lama mengharuskan operator untuk secara berkala mengisi ulang pendingin agar suhu mesin tetap dalam batas normal. Penurunan elastisitas o-ring memperoleh RPN sebesar 210, disebabkan oleh masa pakainya, suhu kerja tinggi, dan tekanan fluida selama operasi; O-ring yang mengeras tidak lagi dapat menyesuaikan diri dengan permukaan penyegel, sehingga pendingin merembes keluar, dan meskipun kebocoran yang dihasilkan relatif kecil, penggantian yang tertunda akan meningkatkan kebocoran dan mempercepat kerusakan permukaan segel.

Goresan poros, korosi pegas, dan penyumbatan lubang drainase memperoleh nilai RPN yang lebih rendah dibandingkan tiga mode kegagalan sebelumnya; Namun demikian, ketiganya masih memerlukan perhatian karena dapat mempercepat kerusakan segel mekanis jika tidak dilakukan perawatan berkala. Secara keseluruhan, hasil FMEA menunjukkan bahwa prioritas pemeliharaan harus difokuskan pada permukaan segel, segel mekanis, dan O-ring, karena ketiga komponen ini paling berkontribusi terhadap kebocoran pada sistem pendingin.

2. Diskusi tentang Analisis Keandalan

Analisis keandalan menunjukkan MTBF selama 1.460 jam, artinya segel mekanis mengalami rata-rata satu kegagalan setiap 1.460 jam operasi, menunjukkan tingkat keandalan yang cukup baik yang masih memerlukan perawatan berkala untuk mencegah penurunan kinerja selama periode operasional. MTTR selama 5 jam menunjukkan bahwa waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki atau mengganti segel mekanis relatif singkat, dipengaruhi oleh ketersediaan suku cadang, prosedur perawatan yang diterapkan di kapal, dan pengalaman kru dalam membongkar dan memasang segel mekanis. Tingkat Kegagalan sebesar 0,000685 kegagalan per jam, yang diperoleh dari MTBF, menunjukkan bahwa probabilitas kegagalan dalam satu jam operasi relatif kecil, meskipun probabilitas ini akan meningkat jika inspeksi rutin diabaikan atau komponen digunakan melebihi masa pakainya. Perhitungan Keandalan menghasilkan 71,0% pada 500 jam operasi, artinya masih ada sekitar 29% kemungkinan kegagalan sebelum mencapai waktu operasional, sehingga aktivitas pemeliharaan preventif tetap diperlukan. Ketersediaan 99,66% menunjukkan bahwa Pompa Air Bersih memiliki tingkat kesiapan operasional yang sangat tinggi karena waktu perbaikan relatif

singkat dibandingkan total waktu operasi, menunjukkan bahwa sistem pendingin masih mampu mendukung operasi mesin utama secara optimal.

3. Hubungan antara FMEA dan Hasil Analisis Keandalan

Hasilnya menunjukkan hubungan erat antara analisis FMEA dan analisis keandalan. Mode kegagalan dengan nilai RPN tinggi terbukti memengaruhi penurunan MTBF dan Keandalan: semakin sering terjadi kebocoran segel mekanis, semakin singkat waktu antara kegagalan, sehingga nilai MTBF menurun, tingkat kegagalan meningkat, dan keandalan pada akhirnya menurun. Sebaliknya, jika aksi pemeliharaan difokuskan pada komponen dengan nilai RPN tertinggi, yaitu permukaan segel, segel mekanis, dan O-ring, frekuensi kegagalan dapat dikurangi, yang akan meningkatkan MTBF, menurunkan Tingkat Kegagalan, meningkatkan Keandalan, dan menjaga Ketersediaan pada tingkat tinggi. Dengan demikian, metode FMEA dapat digunakan tidak hanya untuk menentukan prioritas risiko tetapi juga sebagai dasar untuk merumuskan strategi pemeliharaan yang mampu meningkatkan keandalan sistem pendingin.

4. Perbandingan dengan Riset Sebelumnya

Temuan ini konsisten dengan studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa segel mekanis merupakan komponen penting dalam sistem pompa karena beroperasi secara terus-menerus di bawah kondisi tekanan dan suhu tinggi (Abdillah, 2025). Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa keausan permukaan segel, kerusakan O-ring, dan berkurangnya gaya tekan pegas adalah penyebab utama kebocoran pada sistem pendingin, dan pemahaman mendalam tentang karakteristik kinerja pompa sentrifugal penting untuk menafsirkan bagaimana degradasi tersebut memengaruhi keandalan pompa secara keseluruhan (Cooper et al., 2008). Perlakuan analitis perilaku segel wajah mekanis, termasuk efek gangguan aksial dan ketidakselarasan terhadap kinerja penyegelan, semakin mendukung temuan bahwa kondisi permukaan segel adalah faktor dominan yang mengatur timbulnya kebocoran (Ashby et al., 2026; Carmody, 2014). Selain itu, penerapan metode FMEA dalam studi ini terbukti mampu mengidentifikasi mode kegagalan dengan prioritas tertinggi sehingga tindakan pemeliharaan dapat dilakukan lebih efektif, sesuai dengan panduan yang telah ada tentang penggunaan FMEA dalam proses desain dan pemeliharaan teknik (Fakhravar, 2021), serta analisis keandalan yang dilakukan melalui MTBF, Perhitungan MTTR, Failure Rate, Reliability, and Availability memberikan gambaran kesiapan operasional Pompa Air Tawar dalam mendukung operasi mesin utama kapal, sesuai dengan prinsip pemeliharaan-rekayasa umum untuk peralatan berputar (Mobley, 2011; Bloch & Budris, 2014).

5. Program Pemeliharaan Preventif yang Direkomendasikan

Berdasarkan hasil analisis FMEA dan keandalan, serangkaian rekomendasi pemeliharaan dirumuskan, dengan fokus pada inspeksi berkala dan penggantian permukaan segel, segel mekanis, dan O-ring, serta pemeriksaan terjadwal pegas, poros, dan lubang drainase, seperti yang dirangkum dalam Tabel 16.

Tabel 16. Rekomendasi Pemeliharaan Preventif untuk Segel Mekanis

Tidak.	Komponen	Rekomendasi	Interval
1	Permukaan segel	Periksa keausan dan ganti jika melebihi batas toleransi.	Setiap 1.000 jam operasional
2	Segel mekanis	Periksa kebocoran dan ganti jika ditemukan rembesan cairan pendingin.	Setiap inspeksi mingguan
3	O-ring	Ganti dengan O-ring baru sesuai masa pakainya.	Setiap perombakan
4	Musim Semi	Periksa korosi dan gaya tekan.	Setiap perombakan
5	poros	Periksa kondisi permukaan dan ukur keausan.	Setiap perombakan

Tidak.	Komponen	Rekomendasi	Interval
6	Lubang saluran pembuangan	Bersihkan saluran pembuangan dari endapan pendingin.	Setiap inspeksi harian

Sumber: hasil analisis penelitian, 2026.

KESIMPULAN

Analisis FMEA pada pompa pendingin OSV ARKAREGA mengidentifikasi enam mode kegagalan: keausan permukaan segel, kebocoran segel mekanis, penurunan elastisitas O-ring, goresan poros, korosi pegas, dan penyumbatan lubang drainase, dengan keausan permukaan segel memperoleh Nomor Prioritas Risiko tertinggi (RPN = 280), diikuti oleh kebocoran segel mekanis (RPN = 252) dan penurunan elastisitas O-ring (RPN = 210), menjadikan ketiganya prioritas perawatan utama. Analisis keandalan menunjukkan MTBF 1.460 jam, MTTR 5 jam, tingkat kegagalan 0,000685 kegagalan per jam, keandalan 71,0% pada 500 jam operasi, dan ketersediaan 99,66%, menunjukkan bahwa Pompa Air Tawar memiliki kesiapan operasional yang sangat baik meskipun keandalannya belum mencapai tingkat optimal, Jadi efektivitas pemeliharaan masih perlu ditingkatkan. Oleh karena itu, pemeliharaan preventif harus diperkuat dengan memprioritaskan inspeksi dan penggantian permukaan segel, segel mekanis, dan O-ring sesuai intervalnya, dilengkapi dengan pemeriksaan berkala kualitas poros, pegas, dan cairan pendingin, serta pembersihan lubang saluran secara rutin, sehingga MTBF meningkat, tingkat kegagalan menurun, keandalan meningkat, dan ketersediaan tetap terjaga. Perusahaan pelayaran disarankan untuk memperkuat pemeliharaan preventif terjadwal, memastikan ketersediaan suku cadang segel mekanis di kapal, dan mencatat riwayat kegagalan secara lebih sistematis; Kru ruang mesin harus melakukan inspeksi rutin pada segel mekanis, level pendingin, permukaan segel, O-ring, pegas, dan poros selama setiap perbaikan agar kerusakan terdeteksi lebih awal; dan peneliti masa depan harus memperpanjang periode data operasional dan menggabungkan metode pelengkap seperti Pemeliharaan Berpusat pada Keandalan, Analisis Kegagalan Akar Sebab, atau analisis biaya pemeliharaan untuk memperoleh strategi pemeliharaan yang lebih komprehensif dan efisien dalam meningkatkan keandalan sistem pendingin kapal.

REFERENSI

- Abdillah, H. (2025). Analisis perbaikan segel mekanis pada pompa industri gula. *Jurnal Pendidikan Dan Teknologi Kejuruan Inovatif*, 37–52.
- Akula, S. K., & Salehfar, H. (2021). Analisis Mode Kegagalan dan Efek (FMEA) klasik berbasis risiko pada sistem energi siber-fisik mikrogrid. Simposium Tenaga Amerika Utara 2021, NAPS 2021. <https://doi.org/10.1109/NAPS52732.2021.9654717>
- Ashby, B. S., Pryer, T., & Bailey, N. Y. (2026). Pemodelan dan analisis segel wajah mekanis yang tidak bersentuhan dengan gangguan aksial dan ketidaksejajaran. *Tribology International*, 219(1), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2026.111761>
- Bloch, H. P., & Budris, A. R. (2014). Buku panduan pengguna pompa: Perpanjangan masa pakai. The Fairmont Press/Taylor & Francis.
- Carlson, C. S. (2012). FMEA yang efektif: Mencapai produk dan proses yang aman, andal, dan ekonomis menggunakan analisis mode kegagalan dan efek. John Wiley & Sons.
- Carmody, C. J. (2014). Pemodelan terpasang pada permukaan segel mekanik dan rakitan segel sekunder. *Kongres Mesin Fluida*, 45–54.

- Cooper, P., Tchobanoglous, G., Garbus, R. O., Hart, R. J., Reh, C. W., Sloan, L. G., & Smith, E. C. (2008). Performa pompa sentrifugal. Dalam *Desain Stasiun Pompa* (hlm. 10–11). Elsevier.
- Fakhravar, H. (2021). Penerapan analisis mode kegagalan dan efek dalam proses desain teknik. ArXiv Preprint ArXiv:2101.05444.
- Hopkin, P. (2018). *Dasar-dasar manajemen risiko: Memahami, mengevaluasi, dan menerapkan manajemen risiko yang efektif*. Kogan Page Publishers.
- Kerzner, H., Zeitoun, A., & Vargas, R. V. (2022). *Manajemen proyek generasi berikutnya: Pilar keunggulan organisasi*. John Wiley & Sons.
- Kuantitatif, P. P. (2016). *Metode penelitian kuantitatif kualitatif dan R&D*. Alfabeta, Bandung.
- Kumar Akula, S., Salehfar, H., & Behzadiraifi, S. (2022). Perbandingan antara analisis mode dan efek kegagalan tradisional dan fuzzy untuk sistem distribusi listrik jaringan pintar. *Simposium Tenaga Amerika Utara 2022, NAPS 2022*. <https://doi.org/10.1109/NAPS56150.2022.10012165>
- Mobley, R. K. (2011). *Dasar-dasar pemeliharaan*. Elsevier.
- Stamatis, D. H. (2003). *Mode kegagalan dan analisis efek*. Pers berkualitas.
- Youssef, A., Noura, H., El Amrani, A., El Adel, E., & Ouladsine, M. (2024). Survei tentang teknik diagnostik kesalahan berbasis data untuk mesin diesel laut. *IFAC-PapersOnLine*, 58(4), 55–60. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.193>

s